

## WDM 网状网中的基于平面构造的业务量疏导算法<sup>1</sup>

温海波 李乐民 向兵 王晟

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

**摘要:** 将多个低于一个波长带宽的低速业务流复用到一个波长上传输的业务量疏导已经得到越来越多的研究。WDM/SDH 环网中的业务量疏导已得到大量研究, WDM 网状网中的业务流疏导问题研究相对较少。该文研究静态环境下波长数目受限的业务量疏导问题, 提出了一种基于平面构造的启发式业务量疏导算法。仿真结果表明该算法比已知的算法具有更好的性能。

**关键词:** 业务量疏导, 波分复用, 选路与波长分配, 分层图

**中图分类号:** TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)04-0542-07

## A Traffic Grooming Algorithm Based on Plane Construction in WDM Mesh Networks

Wen Hai-bo Li Le-min Xiang Bing Wang Sheng

(*Nat. Key Lab of Broadband Opt. Fiber Transm. and Comm. Networks,  
UEST of China, Chengdu 610054, China*)

**Abstract** Traffic grooming, which can multiplex many low-rate traffic streams into one wavelength, has been received much research attention. Much work related to traffic grooming has been done in WDM/SDH rings, and the work is relatively less in WDM mesh networks. In this paper, under static traffic environment, an effective heuristic traffic grooming algorithm based on plane-construction is proposed. Simulation results show that the algorithm performs better than other previously proposed algorithms.

**Key words** Traffic grooming, Wavelength Division Multiplexing (WDM), Routing and wavelength assignment, Layered graph

### 1 引言

随着网络业务量的爆炸性增长以及网络技术和光网络设备器件 (OXC, OADM 等) 的快速发展, 波分复用技术 (WDM) 成为下一代骨干网络的核心技术。基于 WDM 的选路与波长分配 (Routing and Wavelength Assignment, RWA) 算法研究已经相对比较成熟, 这些研究都是基于波长粒度的。由于 WDM 光网络中每个波长可以提供高达上吉比特 (如: OC-48, OC-192, 甚至 OC-768) 的传输容量, 但是很多业务连接请求都小于一个波长粒度, 显然为一个业务连接请求建立一条光路 (lightpath), 资源利用率低。并且由于网络中光纤波长数目等的限制, 不可能为每个业务连接请求建立端到端的独立光路, 因此需要将多个低速业务连接请求汇集起来用一个光路传输, 或者将某些业务连接通过多跳光路 (multihop lightpath) 的相继汇集来传输, 这就是所说的业务量疏导 (traffic grooming) 技术。不需要在本地上 / 下 (add/drop) 业务的光路通过 OXC/OADM 直接旁路 (bypass), 进而减少网络节点的负担。

<sup>1</sup> 2002-10-22 收到, 2003-03-10 改回

国家自然科学基金 (60002004)、教育部科学技术研究重点项目 (02064)、电子科技大学青年科技基金 (YF020102) 资助项目

WDM 网络中的业务量疏导已经得到广泛研究<sup>[1-11]</sup>, 但大部分研究集中在环网 (ring networks)。目前只有较少文献研究了网状网络中的业务量疏导问题<sup>[6-10]</sup>。文献 [6,7,9] 研究动态业务情况下的业务量疏导问题。文献 [8] 用整数线性规划 (ILP) 方法将网状网中业务量疏导、选路和波长分配等问题综合考虑。目前对于静态业务情况下的业务量疏导只有 K. Zhu<sup>[10]</sup> 提出比较好的启发式算法: 最大化单跳业务量 (Maximizing Single-hop Traffic, MST) 和最大化资源利用 (Maximizing Resource Utilization, MRU), 其特点是以网络的最大吞吐量作为优化目标, 波长分配采用 First-Fit 原则, 路由采用自适应算法。但在光纤波长数目作为主要限制条件的情况下, MST 和 MRU 算法所表现出来的网络资源利用率不高。本文研究的目标就是解决在光纤波长数目作为主要限制条件下的业务量疏导问题。

本文研究静态业务下具有波长数目限制的 WDM 网状网中的业务量疏导问题, 以最大化网络吞吐量为第一优化目标、以业务连接端到端时延尽可能短为第二优化目标, 提出了一种启发式算法——平面构造算法 (Plane-Construction Algorithm, PCA)。本算法在考虑网络资源利用率的同时, 还考虑在一个平面内尽量多建光路。第 2 节问题分析, 给出了网络模型以及相关思想; 第 3 节详细描述了 PCA 算法; 第 4 节为算法仿真分析, 给出了 PCA 算法与 K. Zhu 所提出的 MRU 算法 (在相同情况下, MRU 的性能优于 MST) 的性能比较; 第 5 节给出本文结论。

## 2 问题分析

给定 WDM 网状网物理拓扑  $G(N, L, W)$ , 其中  $N$  为节点集;  $L$  为双向链路集, 每条链路由一对方向相反的单向光纤组成;  $W$  为光纤上的波长集。  $|N|$ ,  $|L|$ ,  $|W|$  分别为网络节点数目、链路数目和每根光纤所支持的波长数目。每个网络节点<sup>[10]</sup> 由两部分组成: 波长路由交换机 (WRS) 和接入控制站。WRS 由 OXC、网络控制管理单元以及 OADM 组成, 完成波长的路由以及波长的复用 / 拆复用功能; 接入控制站完成本地业务的上 / 下路 (adding/dropping) 功能以及低速业务疏导 (low-speed traffic-grooming) 功能。假定网络节点不具有波长变换能力, 其光收发器具有完全可调谐的能力。每个波长的最大容量为  $C$ , 所能支持的最小粒度为  $g$ ,  $C$  为  $g$  的整数倍。假定每个波长容量为 OC-48。

定义以下几个变量:

$r(s, d)$ : 节点对  $(s, d)$  的一次业务连接请求, 一般小于一个波长粒度, 其带宽值为  $OC-y$  ( $y \in \{OC-1, OC-3, OC-12\}$ )。其中  $y$  代表业务连接请求的带宽等级。网络中任意节点对  $(s, d)$  间可能存在多个  $r(s, d)$ 。

$d_y^{s,d}$ : 表示节点对  $(s, d)$  间带宽为  $OC-y$  的业务连接请求数目。

$D$ : 业务需求矩阵集合  $D = \{D_y\}$ ,  $D_y = \{d_y^{s,d}\}$ , 其中  $s \in N, d \in N$ 。

由于业务连接请求的带宽都是小于一个波长粒度的, 如何去为各个业务连接进行路由、波长分配以及业务量疏导, 是一个 NP 完全问题<sup>[10]</sup>。在环网中不存在路由问题, 因此这些问题的解决相对容易, 可以将各个业务连接请求组成无链路重叠的环, 然后将多个环组装在一个波长中传输<sup>[11]</sup>。然而在 WDM 网状网中的业务量静态规划中, 如果直接为每个业务进行路由、波长分配并完成业务量疏导, 显然效果不理想。

对于 WDM 网状网我们可以考虑如何将多个业务连接构造成一个平面 (Plane-Construction Algorithm, PCA): 将属于同一节点对的业务汇聚成聚合业务流 (aggregate traffic), 构造业务流平面。将聚合业务流组装 (使用固定路由方式) 到一个波长平面, 并将该波长分配给该平面内的业务流。对于不能直接通过一跳光路组装到波长平面的业务流, 则在建立好的虚拓扑上利用各个虚波长链路 (物理拓扑上的端到端的光路在虚拓扑上表现为一链路, 因此称为虚波长链路) 的剩余资源进行多跳业务量疏导。具体如下: 令  $R(s, d)$  为节点  $s$  和节点  $d$  间的还没有在网络中建立光路 / 分配资源的聚合业务流, 即  $R(s, d) = \sum_y (y \cdot d_y^{s,d})$ 。定义网络资源利用率 RsUtility

为  $R_sUtility = R(s, d) / H_{sd}$ , 其中  $H_{sd}$  为节点对  $(s, d)$  间的最小跳数路径的跳数。RsUtility 值表示各波长链路的平均业务量。业务流平面构造方式如下: 计算各节点对间的最小跳数路径, 从具有最大资源利用率的  $R(s, d)$  开始, 为节点对  $(s, d)$  间的最小跳数路径指定此平面的波长值; 由于波长连续性限制, 对于不能在此平面内完成波长分配的聚合业务流留到其他平面的构造中去。按照这种方式进行下去, 直到用完此平面的所有链路, 此时一个平面的构造完成。如果网络每根光纤的波长数目多 (资源丰富), 则所有业务可以通过一条光路到达宿, 在这种情况下, 所有业务经过的时延最小。否则在已经建立的虚拓扑上, 为各个未建立连接的独立业务流  $r(s, d)$  使用自适应算法计算路由, 计算顺序是按照虚拓扑图上各业务的资源利用率从大到小的顺序。

MRU<sup>[10]</sup> 算法是从具有最大资源利用率的  $R(s, d)$  开始, 使用自适应最短路径算法和 First-Fit 波长分配原则建立虚拓扑, 然后在此基础上进行多跳业务量疏导。

我们用图 1 来进行说明, 假设网络节点数目为 4, 物理链路为单光纤单波长链路, 波长容量为 48, 不妨假设各个节点对  $(a, b)$ ,  $(a, c)$ ,  $(a, d)$ ,  $(b, c)$ ,  $(b, d)$ ,  $(c, d)$  的聚合业务流分别为 30, 72, 24, 32, 26, 24, 因此按照我们的业务流平面构造方式, 建立的直接光路为  $(a, c)$ ,  $(b, d)$ ,  $(a, d)$ ,  $(c, d)$  如图 1(a) 所示, 没建立的业务流有  $R(a, b) = 30$ ,  $R(a, c) = 24$ ,  $R(b, c) = 32$ 。图 1(b) 为对应的虚拓扑, 链路旁边的数字即为该虚波长链路的剩余可用资源, 显然此时可利用虚拓扑上的剩余资源为网络节点对在平面构造中没有成功选路 / 分配资源的各个业务流建立多跳连接。MRU 算法光路情况如图 1(c), 1(d) 所示, 它使用了自适应路由算法中的最短路径算法, 但虚拓扑上无法进一步建立连接, 显然这时 MRU 表现出的性能没有 PCA 算法好。

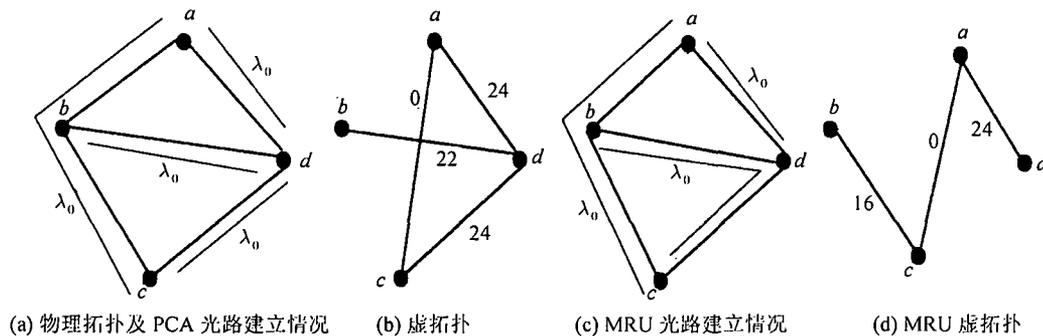


图 1 PCA 算法平面构造示意图

### 3 PCA 算法描述

从前面问题分析我们可以看到 PCA 算法在不同地方分别使用了固定路由和自适应路由算法进行选路, 将网状网中的业务量疏导分为两个部分: 在第 1 部分将各个节点间的业务  $r(s, d)$  进行汇聚, 将每个聚合业务流看成一个波长粒度, 按照资源利用率大小的顺序使用固定路由方式将多个汇聚业务放置在一个波长平面上, 业务较少资源丰富时, 可以在这部分操作中安排好所有业务。第 2 部分在第 1 部分已经建立好的虚拓扑上为没有安排好的业务使用多跳业务量疏导, 建立多跳连接 (此时每跳可以是不同的波长)。PCA 算法具体描述如下:

第 1 部分: 虚拓扑构造 (步骤如下):

(1) 将各个节点对  $(s, d)$  间的业务连接请求进行汇聚, 得到聚合业务流  $R(s, d)$ 。

(2) 计算各个节点对间的最小跳数路径  $p_{sd}$ , 该路径跳数为  $H_{sd}$ 。

(3) 构造一个有序数据结构 Heap, 其中的元素为  $R(s, d)$ , 并且按照资源利用率  $R(s, d) / H_{sd}$  从大到小排序。

(4) for ( $i = 0; i < \text{波长数目}$  并且 Heap 不为空;  $i++$ )

{

while(Heap 不为空)

{

取出 Heap 中的资源利用率最高的  $R(s, d)$ , 检查最小跳数路径  $p_{sd}$  能否在这个波长平面建立 (即看  $p_{sd}$  所经过链路能否分配此波长;  $p_{sd}$  在步骤 (2) 中已经得到)。

(a) 如果能, 在这个光路上安排节点对  $(s, d)$  间的业务连接, 不妨设能够安排下的业务流之和为  $R'(s, d)$ 。令  $\text{FreeBand} = C - R'(s, d)$  (显然  $\text{FreeBand} \geq 0$ ),  $\text{ResidualTraffic} = R(s, d) - R'(s, d)$  (显然  $\text{ResidualTraffic} \geq 0$ )。如果  $\text{ResidualTraffic}$  大于 0, 则令  $R(s, d) = \text{ResidualTraffic}$ , 并将其加入到 Heap 中去。如果  $\text{FreeBand}$  大于 0, 在虚拓扑图中构造剩余带宽为  $\text{FreeBand}$  的虚波长链路 (如果节点对  $(s, d)$  间已经存在一虚波长链路, 则只记录此次的剩余带宽值, 不构造新的虚波长链路); 对于等于 0 的情形, 为了方便后面的计算, 我们不在虚拓扑图中建立对应的虚波长链路。

(b) 如果不能, 则将  $R(s, d)$  加入一个与 Heap 相同的数据结构 tmpHeap 中去。

}

将 tmpHeap 赋予 Heap, 同时 tmpHeap 清空。

}

(5) 如果 Heap 为空, 则算法结束; 否则, 执行第 2 部分, 此时 Heap 中记录了没有能够成功建立的聚合业务流。

第 2 部分: 虚拓扑上的业务量疏导 (步骤如下):

(1) 虚拓扑上计算各个节点对的最短光跳数路径, 将各个节点对间的业务流  $r(s, d)$  按照虚拓扑上的资源利用率从高到底排序。

(2) 在虚拓扑上依次为  $r(s, d)$  选择路径: 根据  $r(s, d)$  的带宽需求以及各个虚波长链路的剩余波长值裁减链路 (一个虚波长链路可能有多个剩余波长值, 只要有一个满足该虚波长链路就不被裁减), 使用自适应路由算法选路, 如果没有找到, 则宣布无法为该  $r(s, d)$  建立连接。

## 4 性能分析与仿真

### 4.1 算法性能评价指标

(1) 阻塞率 (Blocking Probability, BP): 在给定的网络拓扑和业务量需求情况下, 没有成功建立的业务连接请求数与总的业务连接请求数之比, 阻塞率越小, 说明被拒绝的业务请求越少, 算法性能越好。

(2) 时延特性: 在 WDM 光网络中, 一个连接的传输时延取决于物理距离以及光路跳数。我们可以假定每个物理链路的距离相等, 因此物理距离可以说是取决于物理跳数。我们得到两个评价指标: 光路平均物理跳数  $H_p$  和业务连接平均光路跳数  $H_r$ 。跳数越少, 时延越短。

### 4.2 仿真分析

本文采用计算仿真来比较我们提出的 PCA 算法和文献 [10] 中在光收发器可调谐情况下性能最好的 MRU 算法的性能差异。图 2 所示为仿真时使用的 NSFNET 网络拓扑模型, 14 个节点、21 条链路。假定每个节点均具有业务量疏导能力, 每个链路的波长数相同, 每个波长所支持的带宽为 OC-48。业务需求矩阵随机产生可分为两种方式。第 1 种方式为: 每个业务请求只能是单带宽粒度, 即只有 OC-1 存在, 任意节点对间的 OC-1 业务连接请求数目在 [0,96] 间均匀分布。第 2 种方式为多带宽粒度: 任何业务连接请求可以是 OC-1, OC-3 和 OC-4 中的任意一个。具体产生方式为: (1) 每个节点对间的 OC-1 连接请求数目在 [0,48] 间均匀分布; (2) 每

个节点对间的 OC-3 连接请求数目在 [0,8] 间均匀分布; (3) 每个节点对间的 OC-12 连接请求数目在 [0,2] 间均匀分布。

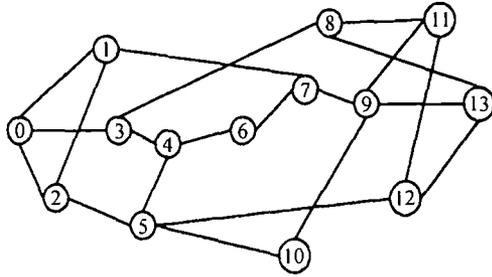


图 2 网络拓扑

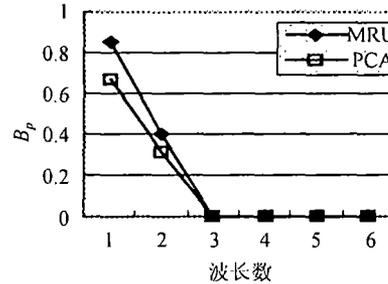


图 3 阻塞率-波长数曲线

图 3 和图 4 是在第 1 种业务需求矩阵产生模型下 PCA 和 MRU 算法的性能比较曲线图。从图 3 中可以看出, PCA 算法的阻塞率比 MRU 算法低, 当波长数增长到 3 时, 两者的平均阻塞率均下降为 0。平均阻塞率为 0, 说明所有的业务要么通过单跳业务量疏导到达目的节点, 要么通过多跳业务量疏导到达目的节点。从图 4(a) 中我们可以看到, 在相同的情况下, 采用 PCA 建立的光路的平均物理跳数低于 MRU 算法所得的平均物理跳数。图 4(b) 业务连接平均光路跳数  $H_r$  先随着波长数的增加而增加, 这是因为波长数目增加, 网络中可建立的光路数增加, 但在虚拓扑的剩余资源上能建立的多跳业务连接数增加更快, 因此  $H_r$  增加。当波长数超过 3 时, 随着波长数增加  $H_r$  下降, 因为当波长数为 3 时, 所有业务已经能够在网络建立连接, 波长增加, 更多的业务通过一跳光路到达宿, 因此  $H_r$  随着波长增加又下降。同时我们可以看到 PCA 算法得到的  $H_r$  比 MRU 得到的  $H_r$  更低。在波长数为 1 时, MRU 的业务连接平均光路跳数为 1, 虽然比 PCA 低, 但是对于在虚拓扑构造时被阻塞的业务, 无法为它们建立多跳光路连接(此时 MRU 的阻塞率大于 PCA 算法所得值)。我们可以得出这样的结论对于单粒度带宽业务 PCA 算法比 MRU 算法性能更好。

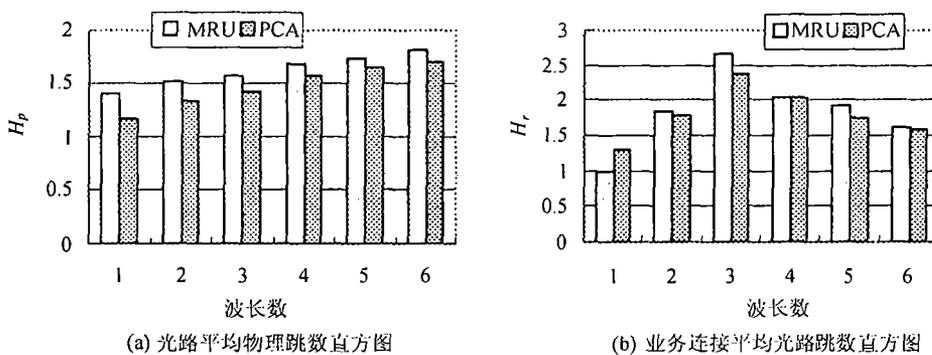


图 4 MRU 和 PCA 算法的性能比较 (业务请求为单一带宽粒度)

表 1 和图 5 为在第 2 种业务需求矩阵产生模型下 PCA 和 MRU 算法的性能比较。从表 1 我们可以看到随着波长数目的增加, 各种粒度的没有成功建立的业务连接请求数目都逐渐减小, 并且 PCA 算法的性能大大好于 MRU 算法的性能。从图 5(a) 中可以看到 PCA 所建立的光路的平均物理跳数低于 MRU; 而图 5(b) 中, 当波长数为 2, 3 时, 由于在虚拓扑的剩余资源上 PCA 所能建立的多跳业务流连接数大大多于 MRU 所能建立的业务连接数 (从表 1 可以看

出), 因此业务连接平均光路数大于 MRU。从整体来说, 对于多粒度业务, PCA 算法也能表现出比 MRU 更好的性能。

表 1 在 NSFNET 中多粒度业务建立情况

波长数	没有成功建立的各种粒度的业务连接数					
	MRU			PCA		
	OC-1	OC-3	OC-12	OC-1	OC-3	OC-12
1	1518	281	87	1518	281	87
2	516	70	49	257	45	48
3	453	59	41	206	42	40
4	263	52	36	0	39	27
5	0	0	6	0	0	0

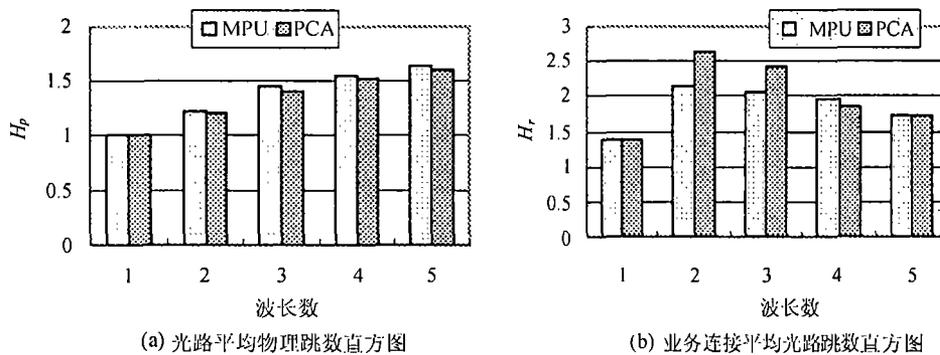


图 5 MRU 和 PCA 算法的性能比较 (业务请求为多带宽粒度)

## 5 结论

在本文中, 我们研究了静态业务下具有波长数目限制的 WDM 网状网中的业务量疏导问题, 提出了一种以最大化网络吞吐量为第一优化目标、以业务连接端到端时延尽可能短为第二优化目标的业务量疏导算法——平面构造法 (PCA)。PCA 算法考虑在光纤波长数目限制条件下, 如何充分利用网络资源, 进行业务量疏导。该算法使用固定路由方式构造波长平面, 在虚拓扑的剩余资源上使用自适应路由算法进行业务量疏导。仿真结果证明 PCA 算法, 无论是在单粒度带宽业务还是在多粒度带宽业务情况下, 与已知算法相比, 都能更充分地利用网络资源, 提供更高的网络吞吐量。因此 PCA 算法是一种有效的业务量疏导算法, 具有很好的性能。

## 参 考 文 献

- [1] Modiano E. Traffic grooming in WDM networks, *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(7): 124-129.
- [2] Rudra Dutta, George N. Rouskas. Traffic grooming in WDM networks: past and future. NCSU CSC Technical Report TR-2002-02. <ftp://ftp.csc.ncsu.edu/pub/tech/2002/TR-2002-11.ps.Z>. <http://www.csc.ncsu.edu/faculty/GRouskas/Ar0ra/Journals/Network-Dutta-2002.pdf>
- [3] Special Issue: Telecommunications Grooming. *Optical Networks Magazine*, 2001, 2(3).
- [4] Chium A L, Modiano E H. Traffic grooming algorithms for reducing electronic multiplexing costs in WDM ring networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(1): 2-12.
- [5] V. R. Konda, Chow T Y. Algorithm for traffic grooming in optical networks to minimize the number of transceivers. 2001 IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, Dallas, Texas USA, 2001: 218-221.

- [6] Srinivasan R, Somani A K. Request-specific routing in WDM grooming networks. ICC 2002, IEEE International Conference on Communications, New York, USA, 2002, vol.5: 2876-2880.
- [7] Srinivasan R. Dynamic routing in WDM grooming networks. Technical Report, Dependable Computing & Networking Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, Iowa State University, August, 2001. [http://ecpe.ee.iastate.edu/dcnl/technical\\_report/DCNL-ON-2001-001.pdf](http://ecpe.ee.iastate.edu/dcnl/technical_report/DCNL-ON-2001-001.pdf)
- [8] Hu J Q, Leida B. Traffic grooming, routing, and wavelength assignment in optical WDM mesh networks. Sixth INFORMS Telecommunications Conference, Boca Raton, Florida, USA, March 10-13, 2002. <http://people.bu.edu/hqiang/papers/grw.pdf>
- [9] Thiagarajan S, Somani A. Traffic grooming for survivable WDM mesh networks. *Optical Networks Magazine*, 2002, 3(3): 88-98.
- [10] Zhu K, Mukherjee B. Traffic grooming in an optical WDM mesh network. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(1): 122-133.
- [11] Zhang X, Qiao C. An effective and comprehensive approach for traffic grooming and wavelength assignment in SONET/WDM rings. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2000, 8(5): 608-617.

温海波: 男, 1976年生, 博士生, 目前主要研究方向为 WDM 光网络技术, 包括 RWA、业务量疏导以及网络生存性.

李乐民: 男, 1932年生, 教授, 博士生导师、中国工程院院士, 目前主要研究方向为通信网与宽带通信技术.

向兵: 男, 1970年生, 博士生, 主要研究方向为 WDM 光网络技术.

王晟: 男, 1971年生, 博士, 副教授, 目前主要研究方向为通信网与宽带通信技术.